

УДК 621.3.032:539.23

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ  $Al_2O_3$   
НА ХОЛОДНЫХ КАТОДАХ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**А.П. Королев, Д.М. Мордасов**

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
korolevanpal@yandex.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором Ю.В. Воробьевым*

**Ключевые слова и фразы:** оптическая система; показатель преломления; поляризация; тонкие пленки; эллипсометр.

**Аннотация:** Рассмотрен вопрос измерения толщины тонких прозрачных пленок на отражающих подложках. Так как тонкие пленки по своим оптическим свойствам могут отличаться от толстых пленок того же химического состава, то предлагается способ определения этих свойств на исследуемом образце. Измерив оптические характеристики конкретной пленки, можно измерить ее толщину более точно, чем в том случае, когда пользуются при измерениях справочными данными.

---

При изготовлении холодных катодов для различных лазерных приборов применяется термическое окисление заготовок катодов. Толщину слоя окисла необходимо контролировать. Существуют различные способы измерения толщины – прямые и косвенные. Косвенные методы менее наукоемкие, но и менее точные, чем прямые. К косвенным методам измерения толщины покрытия можно отнести резистивные, емкостные и другие методы. В качестве прямых методов целесообразно использовать оптические методы. В статье предлагается описание метода измерения толщины пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$  на алюминиевом свидетеле с использованием эллипсометрии. Свидетель здесь – это алюминиевый образец, который подвергается окислению в технологическом процессе вместе с заготовкой катода.

Эллипсометрический метод контроля параметров тонких прозрачных пленок использует монохроматический свет эллиптической поляризации. Поляризация – общее свойство всех типов векторных волн. Поляризация характеризует поведение во времени одного из векторов поля.

Световые волны имеют электромагнитную природу, поэтому для их полного описания требуется четыре основных вектора: напряженность электрического поля  $\vec{E}$ , плотность электрического смещения  $\vec{D}$ , напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  и плотность магнитного потока  $\vec{B}$ . Для определения состояния поляризации световых волн выбран вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Такой выбор объясняется тем, что при взаимодействии света с веществом сила, действующая

щая на электроны, определяется именно электрическим полем световой волны. Поведение трех остальных векторов определяется поведением вектора  $\vec{E}$ , так как все четыре вектора связаны между собой уравнениями Максвелла.

Колебания электрического вектора  $\vec{E}$  можно разложить на три независимых линейных гармонических колебания  $E_x, E_y$  и  $E_z$ :  $\vec{E} = E_x\vec{x} + E_y\vec{y} + E_z\vec{z}$ , где  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  – единичные векторы;  $E_i = \tilde{E}_i \cos(\omega t + \delta_i)$ ,  $i = x, y, z$ ,  $\tilde{E}_i$  и  $\delta_i$  – амплитуда и фаза линейного колебания вдоль  $i$ -й координатной оси соответственно,  $\omega$  – круговая частота.

После преобразований [1] при сдвиге фаз на  $\pi/2$  между косинусоидальным и синусоидальным законами каждого  $i$ -го линейного колебания результирующий вектор  $\vec{E}$  можно записать в виде

$$\vec{E} = (a_1 \cos \omega t) \vec{u}_1 + (a_2 \sin \omega t) \vec{u}_2, \quad (1)$$

где  $\vec{u}_1$  и  $\vec{u}_2$  – единичные векторы вдоль направлений результирующих колебаний;  $a_1$  и  $a_2$  – амплитуды этих колебаний.

Согласно [1] координаты конца вектора  $\vec{E}$ , изменяющегося по закону (1), удовлетворяют уравнению эллипса. То есть конец вектора  $\vec{E}$  описывает в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, эллипс. Волна, у которой по такому закону изменяется вектор  $\vec{E}$ , называется эллиптически поляризованной. Эллиптическая поляризация является наиболее общим состоянием поляризации любого монохроматического излучения.

Круговая и линейная поляризации являются частными случаями эллиптической поляризации. Эллипс характеризуется величиной *эллиптичности*  $e$ , которая определяется отношением длин малой  $b$  и большой  $a$  полуосей эллипса  $e = \frac{b}{a}$ .

Если эллиптичность  $e$  равна  $\pm 1$  или нулю, то поляризация соответственно круговая или линейная.

**Теория измерений различных систем на эллипсометрах.** В общем случае эллипсометрию можно определить как методику измерения состояний поляризации поляризованной векторной волны. Для получения информации об исследуемой оптической системе необходимо с позиций электромагнитной природы света рассмотреть внутренние процессы, происходящие при взаимодействии поляризованного света и вещества и изменяющие состояние поляризации монохроматического излучения.

Принципиальная схема эллипсометрической установки приведена на рис. 1. Монохроматическая волна от лазера L пропускается через управляемый поляризатор P, из которого выходит свет известной поляризации. При взаимодействии поляризованного света с исследуемой оптической системой S его поляризация изменяется. Измененное состояние поляризации на выходе системы измеряется и анализируется управляемым анализатором поляризации A, за которым расположен приемник света D.

Оптическая система может изменять состояние поляризации падающей на нее волны посредством одного из процессов или их комбинаций:

1) *отражение или преломление* – световая волна отражается или преломляется на границе двух разнородных сред. Поляризация здесь изменяется скачкообразно;

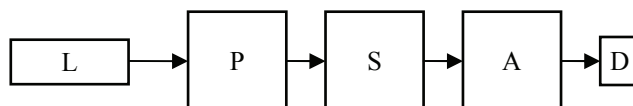


Рис. 1. Принципиальная схема эллипсометрической установки

2) *пропускание* – состояние поляризации изменяется постепенно по мере прохождения в оптическую систему, которая обладает оптической анизотропией;

3) *рассеяние* – среда обладает пространственно-неоднородным показателем преломления, что может быть связано с наличием рассеивающих центров.

Распространение плоских волн в оптически изотропной поглощающей среде описывается комплексным показателем преломления  $N = n - ik$ , где  $n$  – показатель преломления;  $k$  – коэффициент поглощения среды;  $n$  и  $k$  – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления  $N$ .

При измерениях толщины пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1, расположенной между полубесконечной воздушной средой 0 и полубесконечной подложкой 2, предполагаем, что она плоскопараллельная. Внешняя среда 0, пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1 и подложка 2 однородны и характеризуются комплексными показателями преломления  $N_0$ ,  $N_1$  и  $N_2$ . Внешняя среда воздух прозрачна,  $N_0$  – действительная величина. Для определения толщины пленки необходимо рассмотреть лучи: падающие на поверхность пленки; отраженные от поверхности пленки и преломленные в пленку; отраженные от подложки. Ход лучей в оптической системе изображен на рис. 2.

Падающая волна под углом  $\varphi_0$  к нормали к поверхности пленки дает волну, отраженную от поверхности пленки в воздухе, и волну, прошедшую в пленку под углом  $\varphi_1$ , соответствующим показателю преломления  $N_1$ , и отраженную от поверхности подложки. Волна, многократно проходящая между границами 0–1 и 1–2, при однократном прохождении претерпевает изменения фазы  $\beta$ . Эту величину называют *фазовым углом*  $\beta$ , который можно определить по формуле [1]

$$\beta = 2\pi \frac{d}{\lambda} N_1 \cos \varphi_1,$$

где  $\lambda$  – длина волны в вакууме, мкм;  $d$  – толщина пленки, мкм;  $N_1$  – комплексный показатель преломления;  $\varphi_1$  – угол преломления в пленке, град., или при использовании закона Снеллиуса  $N_0 \sin \varphi_0 = N_1 \sin \varphi_1$  [1]:

$$\beta = 2\pi \frac{d}{\lambda} (N_1^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{\frac{1}{2}}.$$

В данном случае падающая волна имеет *p*- или *s*-поляризацию.

Так как среда 0 в нашем случае воздух, то

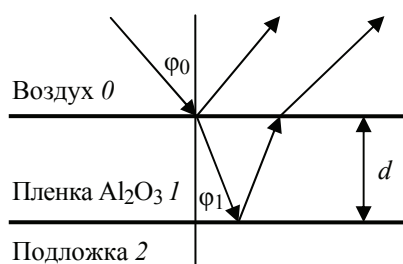
$$N_0 = 1 - i \cdot 0 = 1.$$

Выражение для фазового угла можно записать в виде

$$\beta = 2\pi \frac{d}{\lambda} (N_1^2 - \sin^2 \varphi_0)^{\frac{1}{2}}.$$

Отсюда *толщина пленки*

$$d = \frac{\beta \lambda}{2\pi (N_1^2 - \sin^2 \varphi_0)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2)$$



**Рис. 2.** Ход лучей в системе «воздух 0 – пленка 1 – подложка 2» с плоскопараллельными границами:  $d$  – толщина пленки;  $\varphi_0$  – угол падения на поверхность пленки;  $\varphi_1$  – угол преломления в пленке

Таким образом, определение толщины пленки  $d$  сводится к измерению изменения фазы  $\beta$  при однократном прохождении монохроматического луча через пленку.

Но при расчете толщины пленки  $d$  могут возникнуть сложности с точностью используемого показателя преломления пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Данные по оптическим характеристикам оксида алюминия различны в разных источниках, причем различия могут достигать 50 %. Поэтому следует не пользоваться литературными данными, а определить показатель преломления непосредственно в пленке эллипсометрией. Для этого надо воспользоваться методом отражательной эллипсометрии.

Метод отражательной эллипсометрии основан на измерении коэффициентов отражения  $p$ - и  $s$ -поляризованных волн, отношение которых обозначается параметром  $\rho$

$$\rho = \frac{r_p}{r_s}. \quad (3)$$

Часто  $\rho$  записывают в виде  $\rho = \operatorname{tg} \psi e^{i\Delta}$ ; где  $\Delta = \delta_{r_p} - \delta_{r_s}$ .

Здесь  $\psi$  – относительное изменение амплитуды, а  $\Delta$  – разность сдвигов фаз при отражении волн  $p$ - и  $s$ -поляризации.

Если использовать закон Снеллиуса и в выражение (3) подставить значения  $r_p$  и  $r_s$  [1]:

$$r_p = \frac{N_1 \cos \varphi_0 - N_0 \cos \varphi_1}{N_1 \cos \varphi_0 + N_0 \cos \varphi_1}; \quad r_s = \frac{N_0 \cos \varphi_0 - N_1 \cos \varphi_1}{N_0 \cos \varphi_0 + N_1 \cos \varphi_1},$$

то получим выражение, из которого можно найти показатель преломления пленки, измерив  $\rho$  и зная  $\varphi_0$  и  $N_0$ .

Выражения для расчета *комплексного показателя преломления пленки*:

$$\frac{N_1}{N_0} = \sin \varphi_0 \left[ 1 + \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

или

$$N_1 = N_0 \operatorname{tg} \varphi_0 \left[ 1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 \varphi_0 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

### Выводы

1. Комплексный показатель преломления пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$  можно определить по формулам (4) и (5), зная показатель преломления среды падения луча (в нашем случае воздуха) и измерив эллипсометрическое отношение

$\rho = \frac{r_p}{r_s}$  при одном угле падения  $\varphi_0$ .

2. Толщину пленки  $d$  оксида алюминия  $Al_2O_3$  можно рассчитать по формуле (2), измерив фазовый угол  $\beta$ .

*Работа выполнена в рамках ведомственной целевой программы «Развитие научной деятельности в сфере высшего образования и науки Тамбовской области на 2010–2012 годы», соглашение № 09-21/02 МУ-12 и при поддержке гранта РФФИ 12-08-00046-а.*

### Список литературы

1. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара. – М. : Мир, 1981. – 583 с.

## Determining the Thickness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Film on Cold Cathodes by Optical Method

A.P. Korolev, D.M. Mordasov

*Department "Materials and Technology", TSTU;  
korolevanpal@yandex.ru*

**Key words and phrases:** ellipsometer; optical system; polarization; refractive index; thin films.

**Abstract:** The paper explores the problem of measuring the thickness of thin transparent films on reflecting substrates. As thin films can differ from thick ones with the same chemical composition by their optical properties, we propose the technique to determine these properties on the examined sample. Having measured the optical characteristics of a particular film, we can measure its thickness more accurately than in case of measuring by reference data.

---

### Bestimmung der Dicke der Folie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> auf den kalten Kathoden von der optischen Methode

**Zusammenfassung:** Es ist die Frage der Messung der Dicke der feinen durchsichtigen Folien auf den widerspiegelnden Unterlagen betrachtet. Da sich die feinen Folien nach den optischen Eigenschaften von den dicken Folien der selben chemischen Zusammensetzung unterscheiden können, so wird die Weise der Bestimmung dieser Eigenschaften auf dem untersuchten Muster vorgeschlagen. Die optischen Charakteristiken der konkreten Folie gemessen, kann man ihre Dicke genauer messen als im Fall, wenn bei den Messungen die Nachschlageangaben benutzt werden.

---

### Définition de l'épaisseur de la pellicule Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sur les cathodes froides par une méthode optique

**Résumé:** Est examinée la question de la mesure de l'épaisseur des pellicules fines transparentes sur les supports reflétants. Puisque les pellicules fines ne peuvent pas différer par ses propriétés optiques des grosses pellicules de la même composition chimique, est proposé un moyen de la définition de ces propriétés sur modèle étudié. Après avoir mesuré les caractéristiques optiques de la pellicule concrète, on peut mesurer son épaisseur plus précisément que dans le cas où l'on utilise des données de renseignements lors de la mesure.

---

**Авторы:** *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», декан энергетического факультета, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».